

PATENT APPLICATION

IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE

In re the Application of

Kazunori ANAZAWA et al.

Application No.: 10/724,192

Filed: December 1, 2003

Docket No.: 117883

For: ACTIVE ELECTRONIC DEVICE AND ELECTRONIC APPARATUS

CLAIM FOR PRIORITY

Commissioner for Patents
P.O. Box 1450
Alexandria, VA 22313-1450

Sir:

The benefit of the filing date of the following prior foreign application filed in the following foreign country is hereby requested for the above-identified patent application and the priority provided in 35 U.S.C. §119 is hereby claimed:

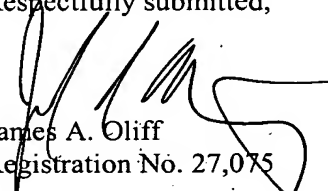
Japanese Patent Application No. 2002-356610 filed December 9, 2002

In support of this claim, a certified copy of said original foreign application:

☒ is filed herewith.

It is requested that the file of this application be marked to indicate that the requirements of 35 U.S.C. §119 have been fulfilled and that the Patent and Trademark Office kindly acknowledge receipt of this document.

Respectfully submitted,


James A. Oliff
Registration No. 27,075

Joel S. Armstrong
Registration No. 36,430

JAO:JSA/tmw

Date: December 31, 2003

OLIFF & BERRIDGE, PLC
P.O. Box 19928
Alexandria, Virginia 22320
Telephone: (703) 836-6400

<p>DEPOSIT ACCOUNT USE AUTHORIZATION Please grant any extension necessary for entry; Charge any fee due to our Deposit Account No. 15-0461</p>

日 本 国 特 許 庁
JAPAN PATENT OFFICE

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出 願 年 月 日 2 0 0 2 年 1 2 月 9 日
Date of Application:

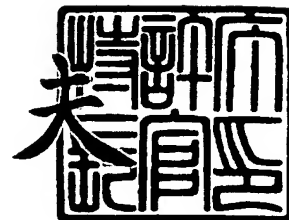
出 願 番 号 特 願 2 0 0 2 - 3 5 6 6 1 0
Application Number:
[ST. 10/C]: [J P 2 0 0 2 - 3 5 6 6 1 0]

出 願 人 富 士 ゼ ロ ッ ク ス 株 式 有 限 公 司
Applicant(s):

2 0 0 3 年 1 2 月 4 日

特 許 庁 長 官
Commissioner,
Japan Patent Office

今 井 康 夫



【書類名】 特許願

【整理番号】 FE02-02065

【提出日】 平成14年12月 9日

【あて先】 特許庁長官殿

【国際特許分類】 H01L 51/00

【発明者】

 【住所又は居所】 神奈川県足柄上郡中井町境 4 3 0 グリーンテク なかい
 富士ゼロックス株式会社内

 【氏名】 穴澤 一則

【発明者】

 【住所又は居所】 神奈川県足柄上郡中井町境 4 3 0 グリーンテク なかい
 富士ゼロックス株式会社内

 【氏名】 真鍋 力

【発明者】

 【住所又は居所】 神奈川県足柄上郡中井町境 4 3 0 グリーンテク なかい
 富士ゼロックス株式会社内

 【氏名】 渡邊 浩之

【発明者】

 【住所又は居所】 神奈川県足柄上郡中井町境 4 3 0 グリーンテク なかい
 富士ゼロックス株式会社内

 【氏名】 鹿志村 洋次

【発明者】

 【住所又は居所】 神奈川県足柄上郡中井町境 4 3 0 グリーンテク なかい
 富士ゼロックス株式会社内

 【氏名】 清水 正昭

【特許出願人】

 【識別番号】 000005496

 【氏名又は名称】 富士ゼロックス株式会社

 【電話番号】 (0462)38-8516

【代理人】

【識別番号】 100087343

【弁理士】

【氏名又は名称】 中村 智廣

【選任した代理人】

【識別番号】 100082739

【弁理士】

【氏名又は名称】 成瀬 勝夫

【選任した代理人】

【識別番号】 100085040

【弁理士】

【氏名又は名称】 小泉 雅裕

【選任した代理人】

【識別番号】 100108925

【弁理士】

【氏名又は名称】 青谷 一雄

【選任した代理人】

【識別番号】 100114498

【弁理士】

【氏名又は名称】 井出 哲郎

【選任した代理人】

【識別番号】 100120710

【弁理士】

【氏名又は名称】 片岡 忠彦

【選任した代理人】

【識別番号】 100110733

【弁理士】

【氏名又は名称】 鳥野 正司

【手数料の表示】

【予納台帳番号】 012058

【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【包括委任状番号】 9004814

【包括委任状番号】 9004812

【包括委任状番号】 9004813

【包括委任状番号】 9700092

【包括委任状番号】 0000602

【包括委任状番号】 0202861

【包括委任状番号】 0215435

【プルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 能動的電子素子および電子装置

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 カーボンナノチューブと、その両端にそれぞれ接続する第 1 の電極および第 2 の電極と、前記カーボンナノチューブに対向して配置され、前記カーボンナノチューブに電磁波を照射する第 3 の電極と、を含み、

前記カーボンナノチューブに対し前記第 3 の電極から照射される少なくとも高周波の電磁波により、前記カーボンナノチューブに流れる電流量を変化させることを特徴とする能動的電子素子。

【請求項 2】 前記カーボンナノチューブが、金属性を示すことを特徴とする請求項 1 に記載の能動的電子素子。

【請求項 3】 第 1 の電極および第 2 の電極が基板表面に形成され、第 3 の電極が、基板表面または裏面に形成されてなることを特徴とする請求項 1 または 2 に記載の能動的電子素子。

【請求項 4】 前記第 3 の電極から照射される高周波の電磁波により、前記カーボンナノチューブに流れる電流量を、電磁波を全く照射しなかったときに前記カーボンナノチューブに流れる電流量よりも大きくさせることで、前記カーボンナノチューブに流れる電流量を変化させることを特徴とする請求項 1 または 2 に記載の能動的電子素子。

【請求項 5】 前記カーボンナノチューブが、多層カーボンナノチューブであることを特徴とする請求項 1 または 2 に記載の能動的電子素子。

【請求項 6】 前記カーボンナノチューブの長さが、1 nm 以上 100 μ m 以下の範囲内であることを特徴とする請求項 1 または 2 に記載の能動的電子素子。

【請求項 7】 第 1 の電極、第 2 の電極および第 3 の電極が、それぞれ独立に、Au, Pt, Ag, Si よりなる群から選ばれるいずれかの材料からなることを特徴とする請求項 1 または 2 に記載の能動的電子素子。

【請求項 8】 前記基板の比誘電率が、1 以上 100 以下であることを特徴とする請求項 2 に記載の能動的電子素子。

【請求項 9】 前記基板の材質が、酸化シリコン、酸化チタン、酸化アルミニウム、窒化シリコンよりなる群から選ばれるいずれかの材料からなる絶縁体であることを特徴とする請求項 2 に記載の能動的電子素子。

【請求項 10】 カーボンナノチューブと、その両端にそれぞれ接続する第 1 の電極および第 2 の電極と、前記カーボンナノチューブに近接して配置され、これに電磁波を照射する第 3 の電極とを含む能動的電子素子、並びに、前記第 3 の電極から少なくとも高周波の電磁波を出力させる駆動回路を備えたことを特徴とする電子装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、高速動作を行うことができる、新規な能動的電子部品、および、これを用いた電子装置に関するものである。

【0002】

【従来の技術】

【非特許文献 1】

S. J. Tans, et al. Nature, vol. 33, 1998 年, p. 49~51., "Room-temperature transistor based on a single carbon nanotube"

【非特許文献 2】

A. Javey et al. Nano Letters, Vol. 2, 2002 年, p. 929-932. "Carbon Nanotubes Transistor Arrays for Multistage Complementary Logic and Ring Oscillators"

【非特許文献 3】

P. G. Collins, et al. Science, vol. 292, 706~709., "Engineering Carbon Nanotubes and Nanotube Circuits Using Electrical Breakdown"

【0003】

現在、通信回路や論理回路等で用いられている Si 製の電界効果トランジスタ (Si トランジスタ) は、理論的に予測される限界まで小型化し縮小することは簡単なことではない。性能を高め集積率を向上させる目的で Si トランジスタのサイズを縮小するためには、多くの課題がある。

【0004】

例えば、Si トランジスタのサイズが 100 nm 以下になると、作製プロセスでは、露光技術やエッチング技術が困難になり、さらに Si トランジスタの動作も、短チャネル効果や素子温度の上昇に関する問題が現れてくる。論理素子の場合、しきい値以下での伝導効果、出力コンダクタンスおよび素子の電力利得の低下が生じる。ダイナミック・ランダム・アクセス・メモリなどの揮発性メモリや、電氣的消去可能なプログラマブル・ランダム・アクセス・メモリ素子などの不揮発性メモリ素子の場合には、しきい値以下での伝導により、蓄積電荷の漏れやしきい値性能の低下をもたらす。

【0005】

一方、GaAs 等の新しい材料を基本としたトランジスタも考案されているが、加工等が困難で、一部の論理回路や通信素子を除けば、大規模な集積回路への展開は難しい。

【0006】

ところで、最近、カーボンナノチューブが新しい半導体材料として注目されている。これは、カーボンナノチューブの直径が 10 nm 程度で、しかも、バリスティック伝導に近い伝導機構を有するために、高速動作が可能で、素子の発熱も少ないことが期待されているからである。

【0007】

半導体特性を示す単層のカーボンナノチューブを用いて、これまで整流器やトランジスタが試作されてきた。カーボンナノチューブを電子素子として用いることの利点は、カーボンナノチューブの伝導機構がバリスティック伝導という、電子が固体内でほとんど散乱されない状態となっていることにある。すなわち、カーボンナノチューブでトランジスタを構成した場合、高速に動作させることが可

能で、さらに熱の発生が少ない、という利点を有する。

【0008】

また、カーボンナノチューブは、一般的にその直径が1 nmから20 nm程度なので、微細な回路の素子や電極として利用するのも好適である。カーボンナノチューブを用いたデバイスの作製技術も進展しており、単層のカーボンナノチューブから意図的に半導体特性を示すものだけを分別する技術や、不純物のドーピング技術等が開発されている。

【0009】

カーボンナノチューブを用いたデバイスに関しては、これまでにいくつかの技術が開示されている。例えば、半導体特性を示す単層のカーボンナノチューブを白金電極に接続し、室温で動作する電界効果トランジスタを構成する技術（非特許文献1参照）や、カーボンナノチューブでp型とn型のトランジスタを作製し、コンプリメンタリー型のインバータを構成する技術（非特許文献2参照）などが挙げられる。

【0010】

【発明が解決しようとする課題】

しかし、カーボンナノチューブを用いてトランジスタを作製し、その動作をリングオシレータで評価した場合、これまで報告されている動作例では、発振周波数が約200 Hz程度と極めて遅い。この理由として、配線のストレージキャパシターが高いためと推測されるが、一方でカーボンナノチューブ自体のバリステイック伝導との兼ね合いから、カーボンナノチューブでは正常なトランジスタ動作が起きていないとする考えもある。

【0011】

また、カーボンナノチューブで半導体特性を示すものは、単層のカーボンナノチューブだけであり、その単層のカーボンナノチューブにおいても金属性を示すものと半導体特性を示すものとがある。さらに多層のカーボンナノチューブに至っては、金属性を示すもののみである。半導体特性を示すものでないと、通常の電界効果を利用した能動的電子素子を作製することはできない。個々のカーボンナノチューブに多量の電流を流し、金属性を示すものを消失させることによって

、半導体特性のもののみを残すという手法も提案されてはいるが（非特許文献3参照）、操作が煩雑であり大量生産には向かない。

【0012】

このような観点から、工業的には、金属性を示すカーボンナノチューブでも能動的に動作し、しかも、高速動作を実現するデバイス技術が望まれている。

したがって、本発明の目的は、カーボンナノチューブを用いた素子であって、高周波動作に優れた能動的電子素子、および、これを用いた電子装置を提供することにある。

【0013】

【課題を解決するための手段】

上記目的は、以下の本発明により達成される。すなわち本発明の能動的電子素子は、カーボンナノチューブと、その両端にそれぞれ接続する第1の電極および第2の電極と、前記カーボンナノチューブに対向して配置され、前記カーボンナノチューブに電磁波を照射する第3の電極と、を含み、

前記カーボンナノチューブに対し前記第3の電極から照射される少なくとも高周波の電磁波により、前記カーボンナノチューブに流れる電流量を変化させることを特徴とする。

【0014】

本発明者らは、カーボンナノチューブに上記の如く電極を構成し、前記第3の電極により高周波を照射することで、カーボンナノチューブの導電率を変化させることができることを見出し、本発明に想到した。カーボンナノチューブの導電率が変化することにより、そこに流れる電流量が変化し、さらに第1の電極および第2の電極間の抵抗が変化する。

【0015】

本発明の能動的電子素子の基本構成は、カーボンナノチューブを用いた電界効果トランジスタに近似しているが、トランジスタにおいてゲート電極に相当する前記第3の電極により高周波を照射することで、例えば多層カーボンナノチューブの如く金属性を示すカーボンナノチューブを用いても導電率を制御することができ、半導体特性を示す単層カーボンナノチューブでなくとも能動的電子素子を

実現することができた点で、画期的である。

【0016】

したがって、今までデバイス作製の議論は、半導体特性を示す単層カーボンナノチューブが必然であったが、本発明により、その範囲が多層カーボンナノチューブや、金属性を示す単層カーボンナノチューブにまで広がり、デバイス作製の容易化、低コスト化への寄与が極めて大きい。

【0017】

本発明の能動的電子素子は、3つの電極とカーボンナノチューブとが既述の如く関連付けられることが基本構成となるが、実際の素子構成としては、例えば、第1の電極および第2の電極が基板表面に形成され、第3の電極が、基板表面または裏面に形成されてなる。

【0018】

本発明の能動的電子素子は、例えば、前記第3の電極から照射される高周波の電磁波により、前記カーボンナノチューブに流れる電流量を、電磁波を全く照射しなかったときに前記カーボンナノチューブに流れる電流量よりも大きくさせることで、前記カーボンナノチューブに流れる電流量を変化させる能動的電子素子とすることができる。

【0019】

前記カーボンナノチューブとしては、特に制限は無いが、既述の如く多層カーボンナノチューブを用いることができ、その長さとしては、一概には言えないが、例えば1 nm以上100 μ m以下の範囲内から選択することができる。

第1の電極、第2の電極および第3の電極としては、特に制限は無いが、それぞれ独立に、Au, Pt, Ag, Siよりなる群から選ばれるいずれかの材料からなるものとすることができる。

【0020】

本発明の能動的電子素子を基板表面ないし裏面に構成する場合には、当該基板の比誘電率としては、1以上100以下であることが一般的であり、その材質としては、特に制限は無いが、酸化シリコン、酸化チタン、酸化アルミニウム、窒化シリコンよりなる群から選ばれるいずれかの材料からなる絶縁体とすることが

できる。

【0021】

一方、本発明の電子装置は、カーボンナノチューブと、その両端にそれぞれ接続する第1の電極および第2の電極と、前記カーボンナノチューブに近接して配置され、これに電磁波を照射する第3の電極とを含む能動的電子素子（すなわち、本発明の能動的電子素子）、並びに、前記第3の電極から少なくとも高周波の電磁波を出力させる駆動回路を備えたことを特徴とする。

【0022】

【発明の実施の形態】

以下、本発明を実施形態を挙げて具体的に説明する。

図1は、本発明の能動的電子素子の一実施形態を示す模式平面図である。本実施形態の能動的電子素子は、基板2の表面に形成されたソース電極（第1の電極）Sおよびドレイン電極（第2の電極）D間を橋渡しするようにカーボンナノチューブ1が配置され、さらに基板2の表面におけるカーボンナノチューブ1に近接した位置にゲート電極（第3の電極）Gが形成されて構成される。

【0023】

なお、本発明の能動的電子素子は、トランジスタとして機能するものではないが、その構成が電界効果型トランジスタに近似しており、外的作用により2電極間の電流特性に変化が生じる点で機能も近似しているため、各電極名についてもトランジスタの用語であるソース、ドレインおよびゲートの各用語を用いて説明する。勿論、第1の電極と第2の電極とで位置付けに差はないため、どちらをソース、ドレインと捉えることもできるが、本説明では、第1の電極をソース電極、第2の電極をドレイン電極として説明する。

【0024】

このような基本構成の本実施形態の動的電子素子は、ゲート電極Gから所定の周波数帯域、かつ所定の強度範囲の高周波を照射すると、カーボンナノチューブ1の導電率が変化して、ソース電極S－ドレイン電極D間の抵抗値も変化する。したがって、ソース電極S－ドレイン電極D間に電圧を印加した場合の電圧－電流の特性にも変化が生じる。すなわち、本実施形態の能動的電子素子は、ゲート

電極Gにより照射する電磁波の周波数によって、ソース電極Sードレイン電極D間の電流特性を能動的に制御することができる。

【0025】

本発明の能動的電子素子の原理そのものは、不明であるが、カーボンナノチューブの高周波伝送特性と相関があるものと推測される。以下に、多層カーボンナノチューブを例に挙げて、高周波伝送特性について説明する。

【0026】

多層カーボンナノチューブの両端にAu電極を接続し、ベクトルネットワークアナライザー（アジレントテクノロジー製8753ES）と同軸エアラインから構成される測定系を使って反射係数および透過係数を測定した。自由空間の透磁率、誘電率が1となるように校正した後、同軸エアラインに試料を挿入し、前記ベクトルネットワークアナライザーの2つのポートを使用して、反射係数（ S_{11} ）、透過係数（ S_{21} ）の2つのパラメータを測定した。

【0027】

すると、反射係数（ S_{11} ）は1GHz近傍に強い損失が存在し、透過係数（ S_{21} ）では、逆に1GHz近傍で透過率が上昇した。このうち特に有意に観測された反射係数（ S_{11} ）の測定データについて、電磁波の周波数を横軸にしてプロットしたグラフを図2に示す。この結果は、測定した多層カーボンナノチューブが、1GHz近傍の電磁波のみを伝達しやすいことを示す。これは、前記多層カーボンナノチューブ内の振動モードと電磁波とが共鳴し、伝送特性を向上させているものと推測できる。

【0028】

一方、カーボンナノチューブは、グラフェンシートから構成されているので、電子構造として様々な波長の電磁波を吸収する理想黒体に近い物質である。したがって、1GHz近傍の高周波を外部から照射すれば、前記多層カーボンナノチューブは電磁波を吸収し、その電磁波を前記多層カーボンナノチューブ内のキャリアに変換し、1GHzで振動するキャリアを伝達することになる。このため、電磁波の照射で前記多層カーボンナノチューブ内の自由なキャリア密度が増し、導電率が向上することになると推測できる。

【0029】

以上の原理は、あくまでもカーボンナノチューブの高周波伝送特性に基づく推測であり、本発明の効果が、上記原理に基づく作用により制限されるものではない。

【0030】

次に、本発明の能動的電子素子の具体的構成について、本実施形態の構成を例に挙げて説明する。

基板2としては、特に制限されるものではなく、従来公知のものから適宜選択して使用することができる。基板2の比誘電率としては、1以上100以下であることが一般的である。また、その材質についても、特に制限は無いが、酸化シリコン、酸化チタン、酸化アルミニウム、窒化シリコンよりなる群から選ばれるいずれかの材料からなる絶縁体とすることができる。

【0031】

ソース電極S、ドレイン電極Dおよびゲート電極Gとしては、特に制限は無いが、それぞれ独立に、Au, Pt, Ag, Siよりなる群から選ばれるいずれかの材料からなるものとすることができる。これらの電極形成には、通常の半導体プロセスを用いて行えばよい。具体的には、スパッタや真空蒸着等が挙げられる。

これら電極の厚みとしては、通常の半導体素子の配線や電極と同様の厚さで問題ないが、一般的には50nm～2μm程度の範囲から選択される。

【0032】

これら電極の位置関係としては、まず、相互に電氣的に独立して（離間して）配置されることが前提である。そして、ソース電極Sとドレイン電極Dとの間隙には、カーボンナノチューブ1が橋渡しされるため、本実施形態においてソース電極Sとドレイン電極Dとの間隙は、基本的にはカーボンナノチューブ1の長さよりも短いことが必須となる。具体的には、10nm～10μm程度、より好ましくは1～5μm程度の範囲から選択される。ただし、本発明においては、カーボンナノチューブを複数本配置して、カーボンナノチューブ相互間で接触させることで全体として両電極間を橋渡しすれば、両電極間の間隙は大きくとることが

できる。

【0033】

ゲート電極Gは、カーボンナノチューブ1にある程度近いことが好ましいが、他の電極にあまりに近づけて電極を形成することは、製造上困難な場合もある。したがって、ゲート電極Gの先端には、カーボンナノチューブ1に向けて、ゲート電極Gから照射される高周波の道筋を補助するための、誘電体層を設けておくことも可能である。この誘電体層は、カーボンナノチューブ1が配置される位置に近接ないし接触させて、あるいはカーボンナノチューブ1が配置される位置の下面にまで及ぶように設けることができ、当該誘電体層とカーボンナノチューブ1とが接触状態となっても構わない。この誘電体層は、例えば TiO_2 等により形成される。

【0034】

また、ゲート電極Gの位置としては、他の電極との関係で決まるのではなく、カーボンナノチューブ1に対して有効に電磁波を照射できる程度に近接状態で対向配置することが条件となる。カーボンナノチューブ1との距離は、照射する電磁波の強度にもよるため一概には言えないが、照射される電磁波に対する応答性を考慮すると、ある程度近接させることが好ましい。具体的には、カーボンナノチューブ1とゲート電極Gとの距離は、例えば、10nm以上5 μ m以下程度の範囲から選択すればよい。

【0035】

ゲート電極Gは、本実施形態では他の電極と同一面である基板2の表面に形成されているが、以上のようにカーボンナノチューブ1との関係で位置を決めればよいので、基板2の裏面側に形成しても何ら差し支えない。また、例えば針状のゲート電極の先端をカーボンナノチューブ1に接近させる等、基板2とは独立した状態でゲート電極を配置しても構わない。

【0036】

カーボンナノチューブ1としては、特に制限されるものではなく、多層カーボンナノチューブ、単層カーボンナノチューブのいずれも使用することができる。特に、本発明の能動的電子素子においては、半導体特性を示さないカーボンナノ

チューブについても良好に用いることができる点が特徴的であり、その意味で、金属性を示す単層カーボンナノチューブおよび多層カーボンナノチューブを能動的な素子の材料に用いることができるメリットが大きい。

【0037】

カーボンナノチューブ1としては、例えば、アーク放電法や化学気相成長法で作製した一般的なものを問題なく使用することができる。また、カーボンナノチューブ1の直径や長さとしては、特に制限は無く、例えば直径が1 nm以上0.1 μ m以下のもの、長さが1 nm以上1 mm以下のものを問題なく使用することができる。

【0038】

カーボンナノチューブ1は、ソース電極Sとドレイン電極Dとの間に橋渡しされる。カーボンナノチューブが1本の場合には、本実施形態のように、その両端がソース電極Sとドレイン電極Dとにそれぞれ接触するように載置した上で、必要に応じて固定する。カーボンナノチューブが複数本の場合には、カーボンナノチューブ相互間が接触して、全体としてソース電極Sとドレイン電極Dとを橋渡しするように載置すればよい。なお、この場合も本発明に言う「カーボンナノチューブの両端にそれぞれ接続」の概念に含めるものとする。

【0039】

また、カーボンナノチューブが複数本の場合、ソース電極Sおよび／またはドレイン電極Dと接触するカーボンナノチューブは、1本でも2本以上でも構わない。全体として、少なくとも1本以上のカーボンナノチューブによる橋渡しが完成していれば構わない。

【0040】

カーボンナノチューブ1をソース電極Sとドレイン電極Dとの間に橋渡しさせるには、例えば、1本もしくは複数本のカーボンナノチューブをマイクロマニピレーターで操作することにより行うことができるが、上記のようにカーボンナノチューブによる橋渡しが最終的に完成していれば、如何なる方法によっても構わない。

【0041】

カーボンナノチューブ1とソース電極Sおよびドレイン電極Dとの間の接続は、電氣的に導通されればよく、例えば、カーボンナノチューブ1の端部とソース電極Sもしくはドレイン電極Dとの接合部に電子ビームを照射することで、電氣的かつ力学的な接合をさらに強固にすることができる。両者の接続は、この方法に限定されず、従来公知の各種方法によることができる。また、特に強固な固着を望まない場合には、単にソース電極Sおよびドレイン電極Dの上にカーボンナノチューブ1を載置するのみでも構わない。

【0042】

以上のようにして製造された本発明の能動的電子素子（後述の実施例で製造したもの）の走査電子顕微鏡写真（20000倍）を図3に示す。なお、写真の倍率は、写真の引き伸ばしの程度により、多少の誤差が生じている。図3に示す本発明の能動的電子素子は、写真上の左右に形成されたソース電極およびドレイン電極の間にカーボンナノチューブが橋渡しされ、その上方にゲート電極が配されている。

【0043】

ゲート電極Gからカーボンナノチューブ1に向けてある高周波を照射すると、当該高周波の影響でカーボンナノチューブの導電率が向上する。この導電率変化により、ソース電極ードレイン電極間の電気抵抗が向上する。したがって、本発明の能動的電子素子は、高周波回路上、能動的デバイスとして作用することになる。

【0044】

以上のように構成される本発明の能動的電子素子は、その構成に応じて、特有の高周波に対して導電率が変化する特性を使用して、各種電子素子として利用することができる。具体的には例えば、特定周波数の高周波検出素子として機能する電子素子や、特定周波数の高周波によりON-OFF制御が可能なスイッチング素子として機能する電子素子として、利用することができる。

【0045】

一方、本発明の電子装置は、カーボンナノチューブと、その両端にそれぞれ接続する第1の電極および第2の電極と、前記カーボンナノチューブに近接して配

置され、これに電磁波を照射する第 3 の電極とを含む能動的電子素子、すなわち、上記本発明の能動的電子素子、並びに、前記第 3 の電極から少なくとも高周波の電磁波を出力させる駆動回路を備えたことを特徴とするものである。前記駆動回路は、高周波の電磁波を出力させ得るものであれば特に制限は無く、従来公知の各種装置を駆動回路に組み込むことができる。その具体例は、後述の実施例における測定システムに用いられたアナログ RF 信号発生器などを例示することができる。

【0 0 4 6】

【実施例】

以下、実施例を挙げて本発明をより具体的に説明するが、本発明は、以下の実施例により制限されるものではない。

（実施例 1）

6 mm×6 mm で厚さ 0.4 mm の N 型 Si (1 0 0) ウエハの表面に熱酸化法で Si の酸化膜を 1 μ m の厚さで成長させ、これを基板とした。

【0 0 4 7】

次に、この基板表面にリフトオフ法で、ソース、ドレインおよびゲートとなる各電極パターンを形成した。具体的には、光露光法でまずフォトリジストを加工し、その上から Ti と Au を電子ビーム蒸着法で蒸着した。このとき、Ti 層と Au 層の厚みはそれぞれ 5 0 0 nm と 8 0 0 nm であった。なお、対向するソース電極とドレイン電極との間隙は 1 μ m、これら両電極の中心軸と垂直方向に 1.5 μ m 離れた位置にゲート電極を形成した。レジストを剥離後、精密洗浄し、形成した電極チップを切り出した。

【0 0 4 8】

次いで、アーク放電法で作製した直径 3 0 nm で長さ 2 μ m の多層カーボンナノチューブの両端を、前記ソース電極およびドレイン電極に橋渡しするように載置し、接続した。具体的には、マイクロマニピレーターで 1 本のカーボンナノチューブを所望の位置に移動させて、電子ビームで両電極 (Au / Ti 電極) と固定し、本実施例の能動的電子素子を製造した。得られた能動的電子素子の走査電子顕微鏡写真を図 3 に示す。

【0049】

得られた能動的電子素子の電気特性を測定するために、図4に示すように測定システムを組んだ。ここで図4は、本実施例の能動的電子素子に、その電気特性を測定するため測定システムを組み込むべく配線を施した状態を表す回路図である。図4の回路図は、本実施例の能動的電子素子の走査電子顕微鏡写真である図3に直接、回路図を書き込んだものである。この回路図の装置は、それ自体、本発明の電子装置として動作するものである。図4の回路図中の半導体パラメータ・アナライザには、アジレントテクノロジー製HP4156Bを用い、アナログRF信号発生器には、アジレントテクノロジー製E4422Bを用いて、測定系を構成した。

【0050】

この測定システムにおいて、ゲート電極に高周波(RF)信号(周波数1MHz~4GHz、強度20dBm)を入力しながら、ソース電極とドレイン電極との間に印加する電圧を掃引(scan)して、ソース電極ードレイン電極間に流れる電流を測定した。また、ゲート電極にRF信号を入力しない場合と、周波数1GHzで強度0dBmのRF信号を入力した場合についても、併せて測定した。

【0051】

図5に、測定結果をグラフにて示す。1GHzで20dBmのRF信号を入力した場合のみ、特徴的に電流が他の場合に比べて約2倍程度流れ、他の場合には、ゲート電極にRF信号を入力しない場合と電流値の値に変化が生じなかったことがわかる。

【0052】

(実施例2)

実施例1と同様にして能動的電子素子を製造し、かつ、同様に測定システム(電子装置)を組んだ。この測定システムにおいて、半導体パラメータ・アナライザおよびアナログRF信号発生器により、導電率の周波数依存性を測定した。その結果を図6に示す。図6において、横軸はゲート電極から照射する電磁波(RF信号)の周波数であり、縦軸は、各周波数で20dBmのRF信号をゲート電

極に入力したときのソース電極－ドレイン電極間の導電率である。この結果から、本実施例の能動的電子素子が、1 GHz 近傍の高周波を検知できる能力を有しており、特定周波数の高周波検出素子として機能することがわかる。

【0 0 5 3】

図 6 のグラフにおける導電率のプロファイルは、既述の図 2 に示す反射係数 (S_{11}) のプロファイルと相関が見られる。このことから、カーボンナノチューブの反射係数（さらには透過係数）が特有の周波数で変化し、その変化に伴い、カーボンナノチューブを接続した 3 端子素子である本実施例の能動的電子素子が、特定周波数の高周波に応答するとの推測が成り立つ。

【0 0 5 4】

【発明の効果】

以上説明したように、本発明によれば、カーボンナノチューブを用いた素子であって、高周波動作に優れた能動的電子素子を提供することができる。本発明の能動的電子素子は、前記第 3 の電極により高周波を照射することで、例えば多層カーボンナノチューブの如く金属性を示すカーボンナノチューブを用いても導電率を制御することができ、半導体特性を示す単層カーボンナノチューブでなくとも能動的電子素子を実現することができた点で、画期的である。

また、本発明によれば、このように高周波動作に優れた画期的な能動的電子素子を用いた電子装置を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【図 1】 本発明の能動的電子素子の一実施形態を示す模式平面図である。

【図 2】 多層カーボンナノチューブの反射係数の測定データについて、電磁波の周波数を横軸にしてプロットしたグラフである。

【図 3】 本発明の能動的電子素子の一例の走査電子顕微鏡写真（2 0 0 0 0 倍）である。

【図 4】 能動的電子素子の電気特性を測定するため測定システムを組み込むべく配線を施して作製した本発明の電子装置の例を、図 3 の走査電子顕微鏡写真に直接書き込んで表した回路図である。

【図 5】 本発明の能動的電子素子の一例について、ゲート電極に高周波信

号を入力しながら、ソース電極とドレイン電極との間に印加する電圧を掃引した際の、ソース電極－ドレイン電極間に流れる電流の変化を表すグラフである。

【図 6】 本発明の能動的電子素子の一例について、導電率の周波数依存性を測定したグラフであり、横軸はゲート電極から照射する電磁波（R F 信号）の周波数、縦軸はソース電極－ドレイン電極間の導電率である。

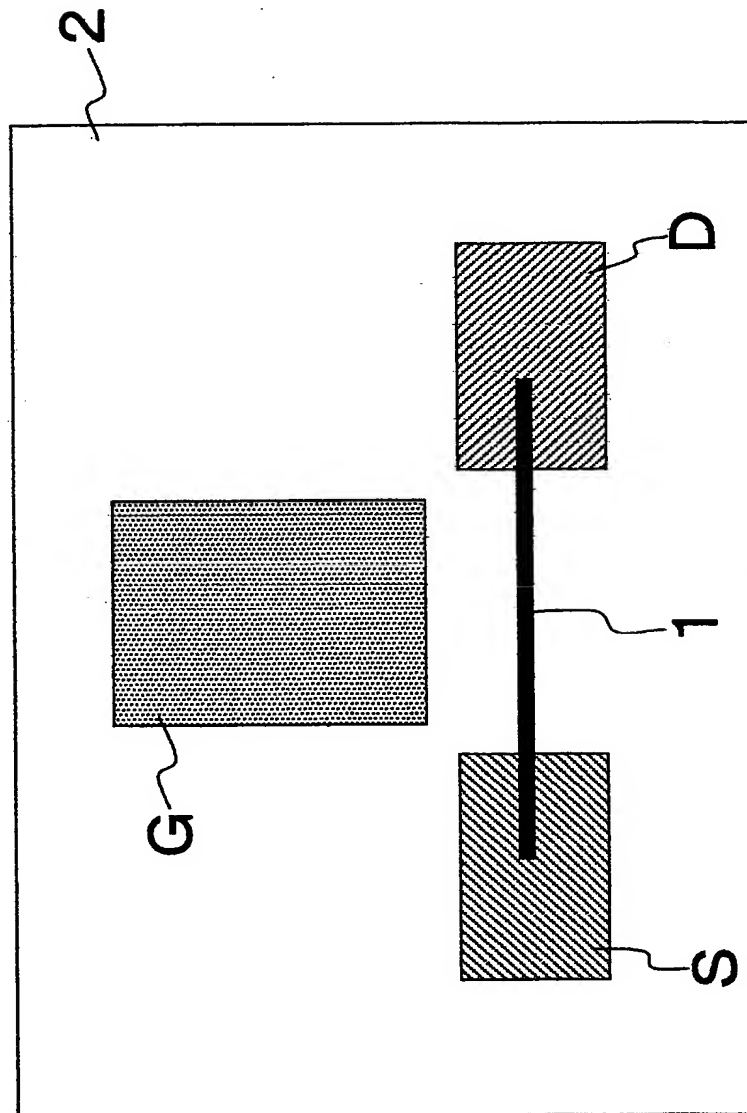
【符号の説明】

1：カーボンナノチューブ、 2：基板、 D：ドレイン電極、 G：ゲート電極、 S：ソース電極

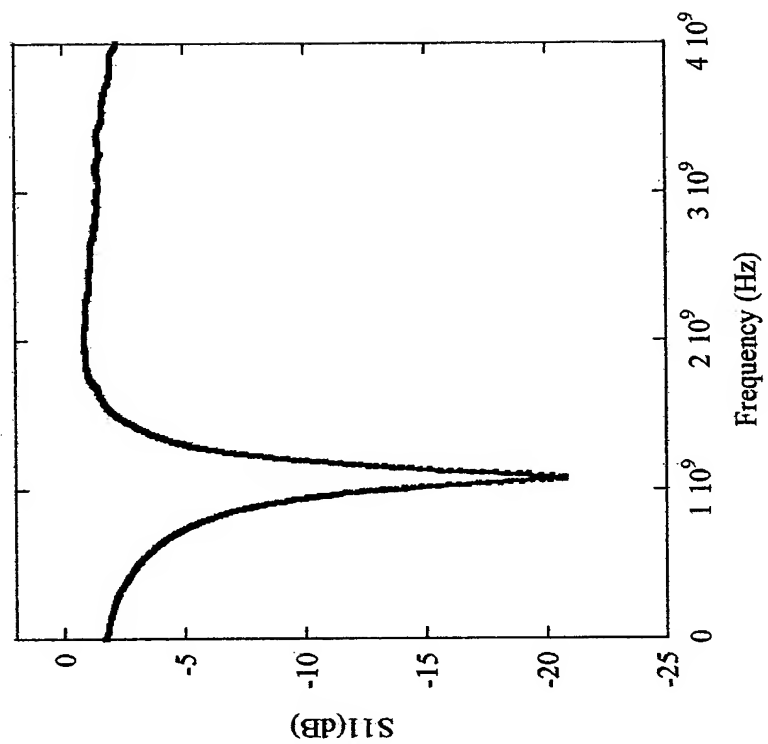
【書類名】

図面

【図 1】

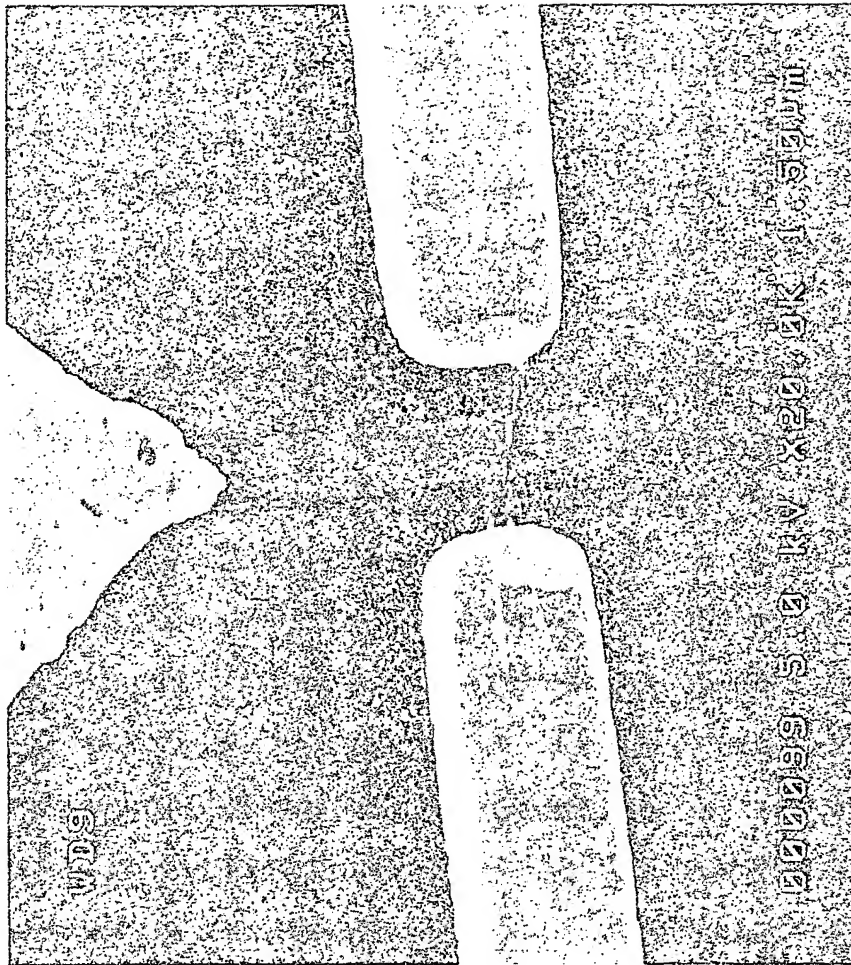


【図 2】

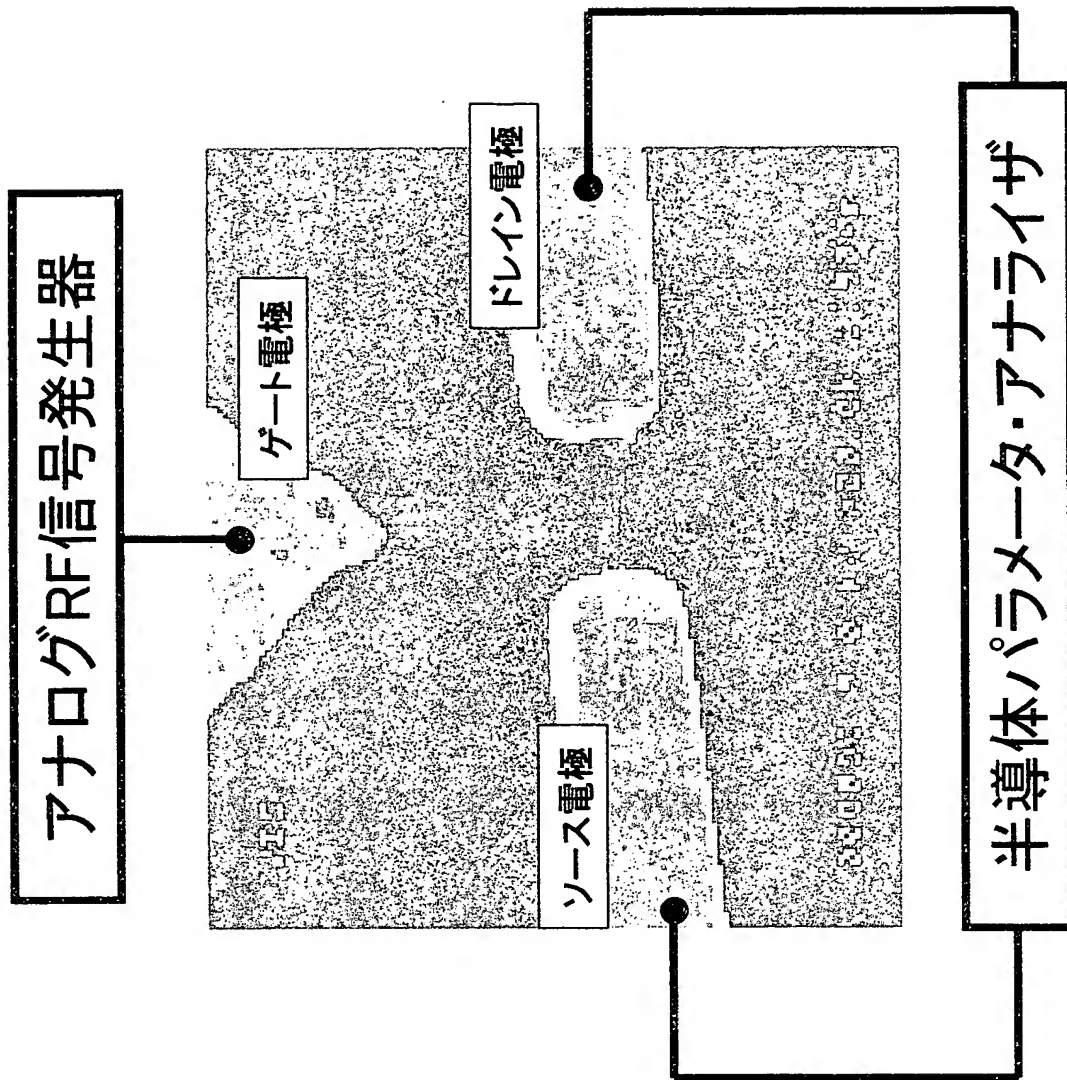


反射係数

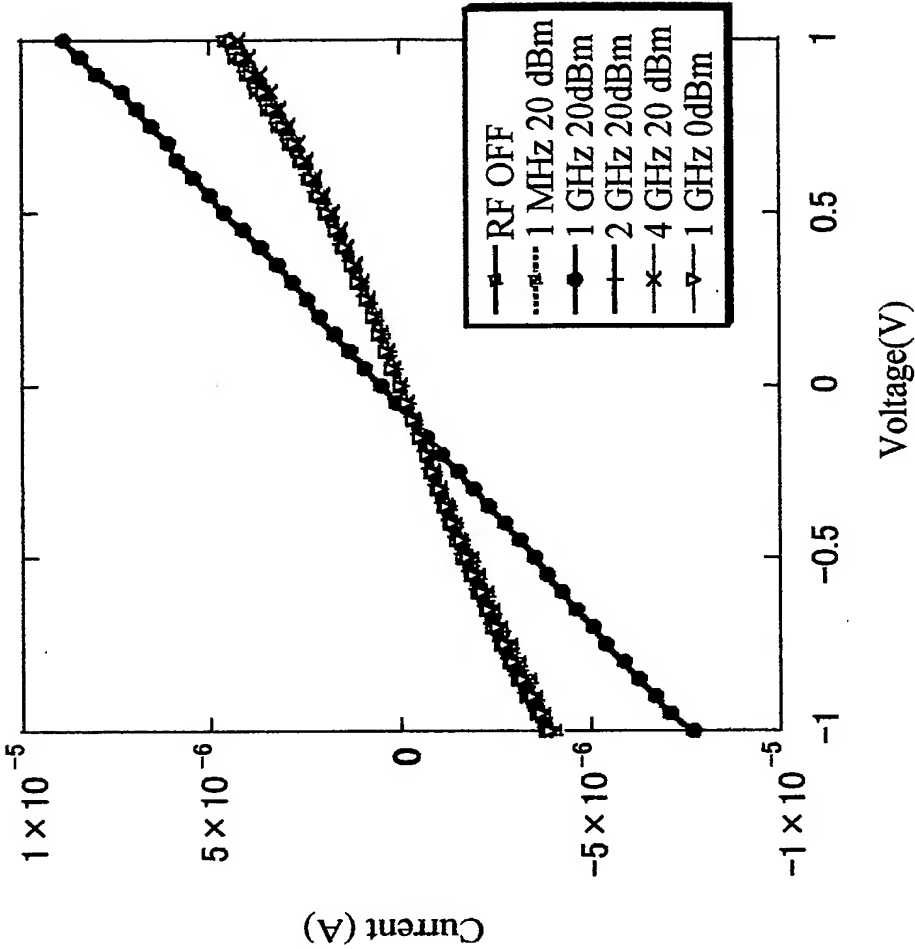
【図 3】



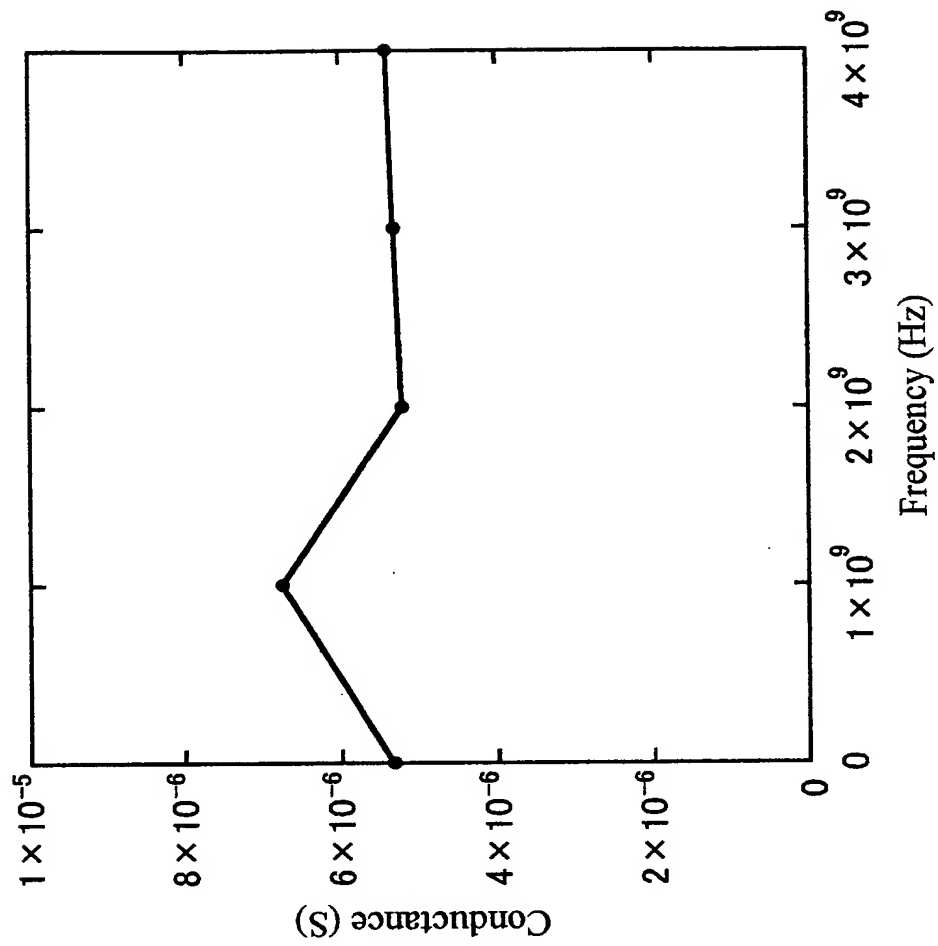
【図 4】



【図 5】



【図 6】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 カーボンナノチューブを用いた素子であって、高周波動作に優れた能動的電子素子、および、これを用いた電子装置を提供すること。

【解決手段】 カーボンナノチューブ 1 と、その両端にそれぞれ接続する第 1 の電極 S および第 2 の電極 D と、カーボンナノチューブ 1 に対向して配置され、カーボンナノチューブ 1 に電磁波を照射する第 3 の電極 G と、を含み、カーボンナノチューブ 1 に対し第 3 の電極 G から照射される少なくとも高周波の電磁波により、カーボンナノチューブ 1 に流れる電流量を変化させることを特徴とする能動的電子素子、および、これを用いた電子装置である。

【選択図】 図 1

特願 2 0 0 2 - 3 5 6 6 1 0

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号

[0 0 0 0 0 5 4 9 6]

1. 変更年月日

1 9 9 6 年 5 月 2 9 日

[変更理由]

住所変更

住 所

東京都港区赤坂二丁目 1 7 番 2 2 号

氏 名

富士ゼロックス株式会社